

화력 발전용 시험연소로의 연소시험 중의 연소진동 실험(I)

Experiments of Combustion Vibration in the Pilot Furnace for Fossil Power Plant under Combustion Test (I)

주 영 호*·김 철 흥**

Young Ho Ju and Cheol Hong Kim

Key Words : Combustion(연소), Pilot Furnace(시험연소로), Combustion Vibration(연소진동), Acoustic Natural Frequency(음향고유주파수)

ABSTRACT

This paper presents results of test for combustion vibration in the pilot furnace for fossil power plant under combustion test. We measured static pressure variation in the pilot furnace together with air and fuel flow. From test results, it shows that vibration magnitude is affected by air and fuel flow. Also, a finite element analysis using a commercial S/W is performed to calculate acoustic mode of the pilot furnace. These results show that dominant frequency occurred is related to acoustic natural frequency of furnace. After this, it needs to be studied the relation between dominant frequency of combustion vibration and air flow rate.

1. 서 론

일반적으로 보일러는 효율적인 연소와 NOx 등 오염물질 배출을 저감하기 위하여 연소기(burner)에서 난류 유동을 생성시킨다. 따라서 연소로(furnace) 내부에는 연소기에서 발생된 난류 유동에 의해 압력맥동(pressure pulsation)이 필연적으로 수반된다. 결국, 이 압력맥동이 보일러의 연소로 진동을 유발시키는 가진원으로 작용한다. 특히, 압력맥동이 보일러 연소로 및 windbox 와 같은 공동(cavity)을 가지는 구조물 내부의 음향 정재파(standing wave)와 일치할 경우, 보일러는 특정 부하 또는 특정 운전 모드에서 공명(acoustic resonance)을 일으켜 압력맥동이 증폭되어 보일러 구조물 전체를 과도하게 진동과 소음을 야기시킬 수 있다⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾.

보일러의 연소 진동을 야기시키는 가진 메커니즘은 이상 난류 흐름(two phase turbulent flow), 불완전 화학적 반응, 열음향 진동(thermoacoustic oscillation) 등과 같은 복잡한 물리적 현상과 연관되어 있어 이론적으로 접근하기는 매우 힘들다. 따라서 이 복잡한 현상에 대한 이해 및 규명은 연소시험 중에 연소진동 시험 그리고 현장설증시험을 통해서만 연소기와 연소로의 진동에 대한 안정

성을 평가할 수 있다.

보일러 및 연소기 설계 제작사는 종종 연소에 의한 압력맥동 발생 그리고 과대한 보일러의 진동 및 소음에 직면하였다. 이러한 문제에 직면했을 때, 보일러 및 연소기 설계 제작사는 그 때 그 때의 현장 문제 대처방안으로 해결하고 있다. 하지만, 선진 보일러 제작사와는 달리 국내는 기본적인 연소진동 발생 인자 및 원인에 대한 지식과 경험에 부족한 실정이다. 따라서 시험연소로의 연소 시험 중에 각종 운전파라미터-연료분사패턴, 연소 공기 노즐, 연료 및 공기량의 차이, 연소로 cavity 공간-영향 등에 파악이 필요하다. 이와 같은 연소 진동 발생 파라미터는 현장의 보일러 연소 진동 해결뿐만 아니라, 설계 단계에서 유용하게 사용될 수 있다.

본 연구는 복잡한 물리적 현상과 연관 되어 있는 연소진동을 야기시키는 가진 메커니즘을 이론적으로 접근하기가 매우 힘들어, 시험연소로의 연소시험 중에 연소로의 진동을 측정하여 각종 운전파라미터(연소공기 및 연료량, swirler 각, 연료노즐 직경 등)에 따른 연소진동 발생인자를 실험적으로 파악하는데 있다.

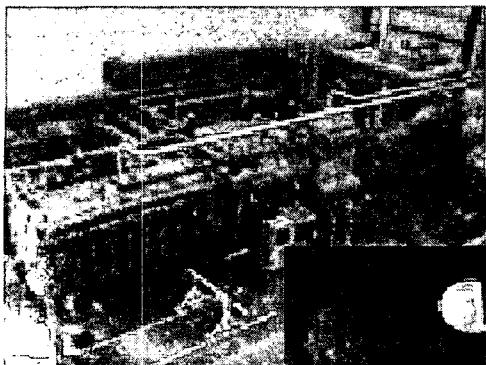
2. 실험

유체유동에 의해 발생하는 압력맥동은 유로 내의 압력센서를 설치하여 측정한다. 압력센서로 통해 측정된 압력맥동은 진동 및 소음측정만으로 알

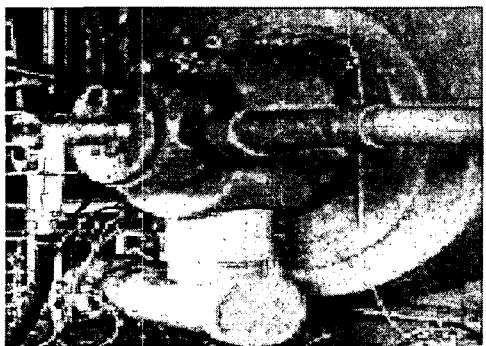
* 두산중공업㈜ 기술연구원

E-mail : yhju@doosanheavy.com
Tel : (055) 278-3719, Fax : (055) 278-8593

** 정회원, 두산중공업㈜ 기술연구원



(a) Pilot furnace



(b) Burner

Fig. 1 Photos of pilot furnace and burner

수 없는 여러 가지 정보를 획득할 수 있다. 진동 및 소음 데이터는 가진원에 의해 발생된 구조물의 진동응답을 나타내므로, 진동원인이 되는 위치파악이 힘들고, 그 크기 또한 알 수 없다⁽²⁾. 특히, 시험연소로는 내벽을 내화벽돌로 이루어져 있기 때문에, 연소로 내의 압력맥동이 아무리 크더라도 연소로 외벽의 진동을 측정하기는 불가능하다. 연소로 내의 압력맥동을 측정하기 위해 연소로의 외벽에 hole을 뚫어 PT tube를 연소로의 내벽까지 연결하여 PT tube에 압력센서를 설치하도록 하였다.

Fig. 1에 당사의 시험연소로 및 연소기 사진을 나타내었고, 본 시험연소로를 이용하여 연소시험 중에 각종 운전파라미터에 따라 연소로 내의 압력맥동을 측정하였다.

Fig. 2에 연소시험 중에 연소로의 압력맥동 측정 및 분석을 위한 측정 개략도를 나타내었다. 압력은 시험연소로 외벽에 구멍(hole)을 뚫어 변동압력을 측정할 수 있는 압전형(piezo type) 압력센서를 설치하였다. 측정한 압력맥동은 각종 운전파라미터에 따라 연소로의 압력맥동을 연속적으로 저장하도록 데이터 레코더(data recorder)를 사용하였

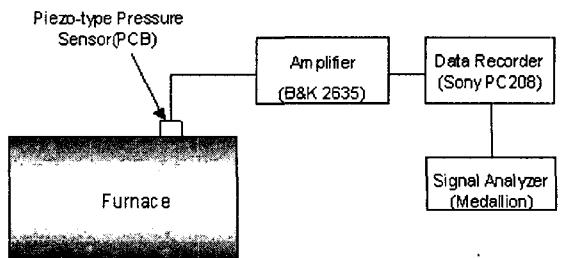


Fig. 2 Schematic of measurement of pressure pulsation for pilot furnace

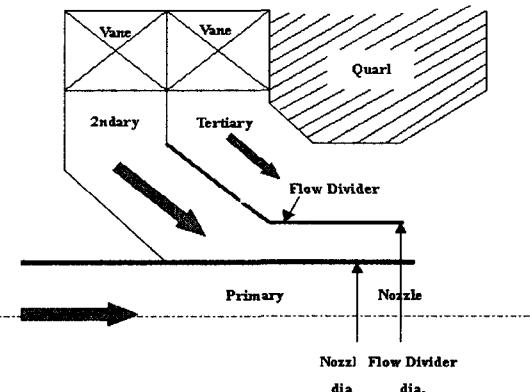


Fig. 3 Schematic of burner system

고, 신호분석기를 통해 압력맥동 신호를 분석하였다.

Fig. 3은 각종 운전 파라미터에 따른 시험연소 시험 중에 있는 연소기를 나타내었고, 본 연구에서 운전 파라미터에 따른 연소 진동 시험에 적용하였다. Fig. 3의 연소기는 저 NOx 버너 미분단에 설계 주안점을 두었기 때문에 연소 공기량을 적절히 조절하여 NOx를 줄이면서 최적의 연소조건이 되도록 1차 공기(primary air, P.A.) 공급뿐만 아니라 2차 공기(secondary air, S.A.), 3차 공기(tertiary air, T.A.) 나누어 별도의 유로를 통해서 공급될 수 있도록 windbox 및 swirler로 구성되었다.

미분단은 미분단 노즐에서 분사되어 1차 공기와 적절히 혼합되어 P.A.통로를 통해 연소로에 분사되며, 2차 및 3차 공기는 swirler를 통해 회전하면서 최적의 연소 조건을 위해 일정한 비율로 조정되어 연소로 내에 분사된다. 본 시험의 연소시험에 사용된 연료량은 250 kg/hr이고, 사용된 석탄은 중국탄이다.

P.A.유량을 단계별로 일정하게 증가시키고, 어느 일정한 각 단계별 P.A.유량에서 S.A.유량을 변화시키면서 연소진동에 의한 압력맥동을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 압력맥동 특성

Fig. 4에 P.A.유량과 S.A.유량 변화에 따른 연소로 내의 압력맥동 변화를 나타내었다. 그림으로부터 P.A.유량 증가에 따라 압력맥동은 증가하지만, S.A.유량 증가에 따라 압력맥동은 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 또한, P.A.유량이 작을수록, S.A.유량이 작을 때 압력맥동이 증가하다가 S.A.유량이 증가함에 따라 압력맥동이 최소화된 후, 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 시험조건시 전체 연소 공기량은 일정하기 때문에 P.A.유량과 S.A.유량이 작을 때, 상대적으로 T.A.유량이 커지게 되어 swirl 하는 T.A.공기의 난류 강도 증대로 인해 압력맥동이 증가한 것으로 사료된다. 반대로 S.A.유량 증가함에 따라 T.A.유량이 감소하게 되어 swirl 하는 T.A.공기의 난류 강도는 감소하지만, swirl 하는 S.A.공기의 난류 강도는 다시 증가하기 시작하여 압력맥동이 어느 정도 감소하였다가 다시 증가한 것으로 판단된다.

요약하면, P.A.유량은 swirl 하지 않기 때문에 swirling에 의한 난류 발생에 기인한 압력맥동은 발생하지 않지만, P.A.유량이 작을 때 상대적으로 S.A.나 T.A.공기유량이 많아지게 되어 swirling하는 공기량 증가로 이어져 결국 난류강도 증가로 인한 압력맥동에 영향을 미치고 있다는 것을 확인

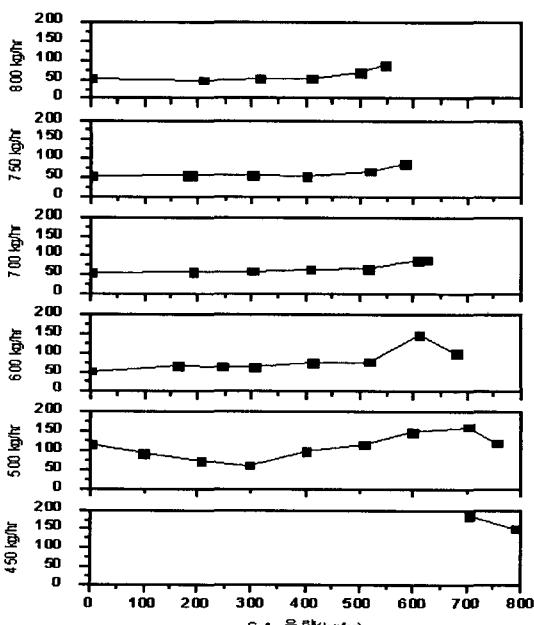


Fig. 4 Pressure pulsation with P.A. and S.A. flow

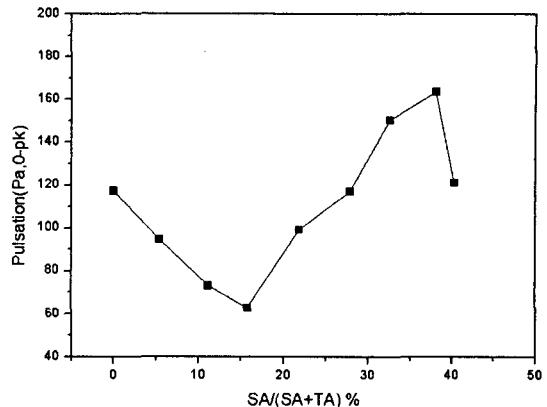


Fig. 5 Pressure pulsation with air flow ratio

할 수 있다.

Fig. 5은 P.A., S.A. 및 T.A.의 공기유량에 대한 연료량 비율에 따라 연소시험 시 측정한 연소로 내의 압력맥동 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 표시된 mp/mc 는 primary 공기질량유량 대 석탄질량유량을 나타내었고, $S.A.(S.A.+T.A.)$ 는 2 차 및 3 차 공기유량 대비 2 차 공기유량 비율을 표시한다.

결과로부터 mp/mc 값이 증가할수록 압력맥동은 감소하며 S.A.공기유량이 증가에 따라 압력맥동은 증가한다. 특히, P.A.공기유량이 작을수록 S.A.공기유량에 따른 압력맥동 증폭은 커진다는 것을 확인할 수 있다.

3.2 실험연소로의 음향모드 및 연소 진동과의 관계

앞 장에서는 연소진동을 발생시키는 원인을 파악하기 위해 실험연소로의 연소기 운전파라미터 조건에 따라 압력맥동 영향을 서술하였다. 연소기에서 발생된 강한 난류 성분은 음향 cavity로 구성된 연소로와 연성되어 연소진동이 증가된다. 즉, 연소기 등에서 발생된 압력맥동이 보일러 연소로 및 windbox와 같은 cavity를 가지는 구조물 내부의 음향 정재파(standing wave)와 일치하여 특정 운전 모드에서 공명을 일으켜 압력맥동이 증폭되어 보일러 구조물 전체를 과도하게 진동과 소음을 야기시킬 수 있다. 따라서 연소기와 연결된 연소로의 음향모드해석은 필수적이다.

Cavity를 가지는 밀폐된 구조물의 음향고유주파수는 다음과 같이 수식적으로 계산할 수 있다.

$$f_{ijk} = \frac{c}{2} \left(\frac{i^2}{L_x^2} + \frac{j^2}{L_y^2} + \frac{k^2}{L_z^2} \right)^{1/2}, \quad i, j, k = 0, 1, 2, \dots$$

위의 식으로부터 특정한 방향으로의 음향고유진

동수 계산식은 유동매체의 음속에 비례하고 유체가 지나가는 덕트폭에 반비례하는 식으로 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$f_n = \frac{nC}{2W}$$

여기서, n : 1, 2, 3, W : Duct cavity 폭, [m], C : Speed of sound, [m/s]

위의 수식은 간단한 형태의 구조로 나타나는 cavity에 대해서는 음향고유진동수를 수식적으로 계산할 수 있지만, 본 연구의 실험연소로처럼 구조가 다소 복잡하고 경계조건이 많을 경우는 일반적으로 많이 사용되고 있는 유한요소법을 이용하여 계산할 수 있다.

Fig. 6에 범용적으로 구조해석에 사용되고 있는 ANSYS를 이용한 실험연소로의 음향모드해석 결과를 나타내었다. 실험연소로의 음향모드해석 시 적용된 유동매체의 물리적 특성은 실험연소로 내의 gas 평균 온도 1200 °C 기준으로 하였다. 음향모드 해석 결과, 4 번째 모드까지 모두 연소기의 연소방향 모드이고, 첫 번째는 49.5 Hz였다.

Fig. 7은 실험연소로의 연소 시험 중에 측정한 실험연소로 내의 압력맥동 스펙트럼을 나타낸 것으로, P.A. 질량유량이 250 kg/hr 그리고 연소공기 유량이 1,900 kg/hr로서 압력맥동이 가장 큰 경우에 대해 나타내었다. 그림으로부터 주진동수는 52.5 Hz이고, 주진동수 근처로 많은 피크가 있음을 알 수 있는 데, 이는 연소기에서 발생된 난류성분이 실험연소로의 첫 번째 음향고유진동수를 여기시킨 것으로 사료된다.

4. 결 론

연소진동을 야기시키는 가진 메커니즘을 이론적으로 접근하기가 매우 힘들어, 시험연소로의 연소시험 중에 연소로의 진동을 측정하여 각종 운전

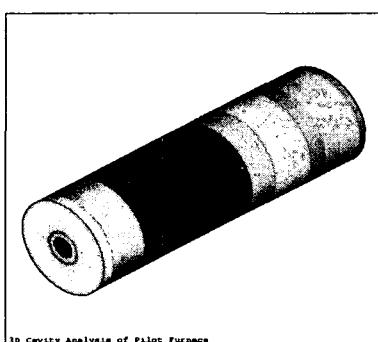


Fig. 6 1st acoustic mode of pilot furnace (49.5 Hz)

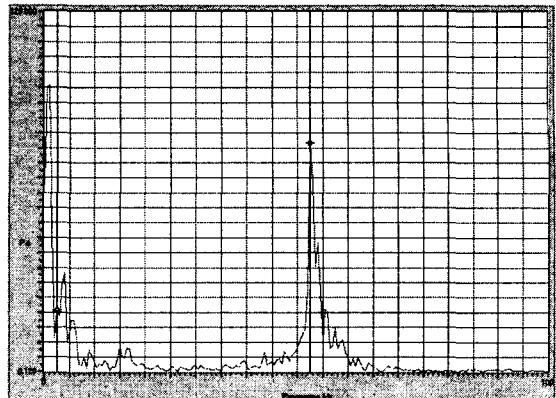


Fig. 7 Vibration spectrum of pilot furnace by experiments under combustion test

파라미터가 연소진동 발생인자를 실험적으로 파악하고자 시험연소로의 연소진동 측정결과를 제시하였다. 측정결과, 연소공기량과 연료량 그리고 연소공기량 비율에 따라 진동에 영향을 미친다는 것을 파악하였다. 또한, 발생한 주진동수는 연소로의 음향고유진동수와 관계가 있다는 것을 알았다. 향후, 연소 진동수와 연소 공기량과의 관계를 규명을 위한 추가적인 실험을 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 지원하는 전력산업연구개발 사업인 “차세대 화력 발전 주기기 설계 및 제작 기술개발” 과제의 일부로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Rogers, J.D. and Gilkey, C. H., 1975, “A Summary of Experiences with Fan Induced Duct Vibrations on Fossil Fueled Boilers,” American Power Conference, Combustion Engineering Publication, TIS-4512.

(2) 김철홍, 주영호, 2003, “화력 발전용 보일러 덕트-팬 시스템의 진동현상에 대한 연구: 입구축 와류에 의한 과대진동 사례,” 한국소음진동공학회 논문집, 제 13 권, 제 3 호, pp. 194~201.

(3) Chen, Y. N., 1967, “Flow-Induced Vibrations and Noise in Tube-Bank Heat Exchangers Due to Von Karman Streets,” ASME, 67-VIBR-48.

(4) 김철홍, 방경보, 주영호, 변형현, 2000, “75 MW급 발전용 보일러 관군에서의 음향공진에 의한 진동/소음 사례연구,” 한국소음진동공학회, 추계학술대회논문집, pp. 150~155.

(5) Putnam, A. A., 1971, Combustion-Driven Oscillations in Industry, American Elsevier Publishing Company, Inc., New York.